

# Model a návrh motoru elektrického vozidla

Radek Čermák

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Fakulta elektrotechnická

Západočeská univerzita v Plzni

[radek@kev.zcu.cz](mailto:radek@kev.zcu.cz)

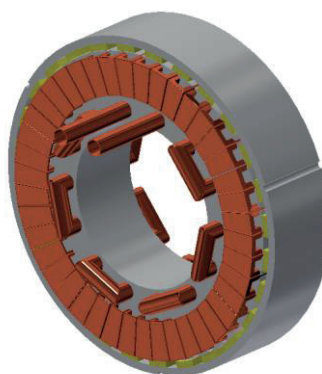
## Model and Design of an Electric Vehicle Motor

**Abstract** – This work deals with thermal design of permanent magnet synchronous motor (PMSM). The designed motor is the in-wheel traction motor for automotive application. The motor consists of an external rotor and inner stator with water cooling system. The thermal calculation is based on the simplified lumped parameters thermal model and it is verified by the finite element method (FEM).

**Keywords** – Electromagnetic design; FEM; Permanent magnet; PMSM; Synchronous motor; Thermal calculation

### I. ÚVOD

Na základě rešerše z literatury [1] a [2] byl zvolen PMSM motor s vnějším rotorem, který bude umístěn v kole vozidla. Díky tomuto umístění je zapotřebí, aby byl dobře chráněn proti vnějším vlivům. Proto byl zvolen plně uzavřený stroj se stupněm krytí IP 55. Jako chlazení byl zvolen typ *IC 3W6*, kdy je stroj chlazen vodou, která je přivedena spirálou procházející těsně pod jhem statoru. Spirála je tvořena 14 měděnými trubkami (1 trubka na 3 drážky), viz Obrázek I. Vnější průměr jedné trubky je 20 mm a tloušťka stěny je 1 mm. Pro motor byla zvolena tepelná třída F s maximální dovolenou teplotou 155°C.



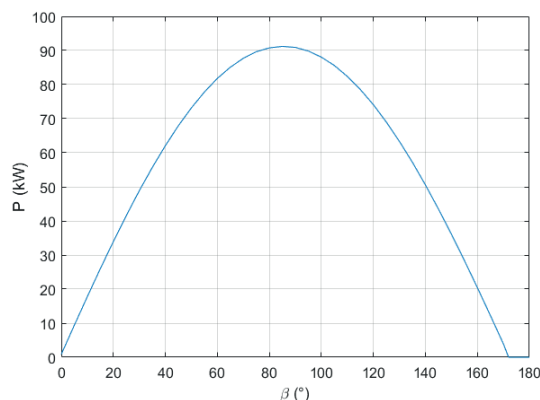
**Obrázek I.** Stator a rotor stroje se zavedeným chlazením

### II. ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH STROJE

#### A. Analytický návrh stroje

Elektromagnetický návrh motoru byl proveden na základě běžně dostupné literatury [2]. Rovnice v literatuře byly upraveny pro motor s vnějším rotorem. Díky snadné konstrukci byl zvolen stroj s povrchovým uložením magnetů a se zubovým vinutím.

Základní parametry motoru jsou uvedeny v Tabulce I Na Obrázku II. je výkonová charakteristika stroje v motorickém režimu.



**Obrázek II. Graf závislosti výkonu na zátěžném úhlu**

**TABULKA I. ZÁKLADNÍ PARAMETRY STROJE**

Základní parametry		Stator		Rotor	
Jmenovitý výkon	40 kW	Počet drážek	42	Počet pólů	28
Sdružené napětí	400 V	Vnější průměr	0,35 m	Vnější průměr	0,385 m
Fázový proud	71,5 A	Délka paketu	0,088 m	Délka paketu	0,090 m
Jmenovitá rychlost	798 ot/min	Vnitřní průměr	0,19 m	Vzduchová mezera	1 mm

Stator je složen z 0,5 mm širokých ocelových plechů SURA M250-50A. Statorové vinutí je uloženo v polouzavřených drážkách a složeno z vodičů kruhového průřezu. Zuby statoru byly navrženy s konstantní šíří na indukci  $B = 1,88$  T. Na povrchu rotoru jsou uloženy permanentní magnety neodým-železo-bor N35UH.

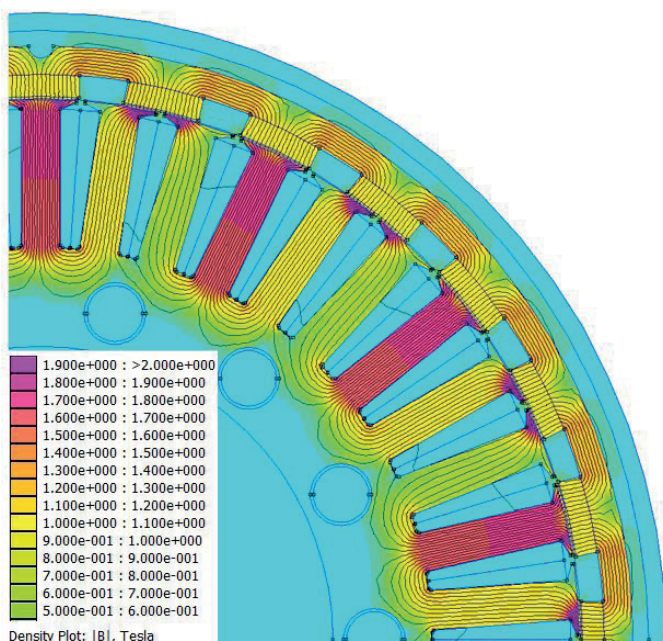
### B. Ověření návrhu stroje

Analytický návrh stroje byl ověřen v řešiči ANSYS – RMxpert. V Tabulce II je uvedeno srovnání vypočítaných a nasimulovaných parametrů náhradního schématu.

**TABULKA II. PARAMETRY NÁHRADNÍHO SCHÉMATU**

Parametr	Návrh	RMxpert
Indukované napětí	191,5 V	192 V
Odpor vinutí	0,085 $\Omega$	0,089 $\Omega$
Synchronní indukčnost	1,226 mH	1,236 mH

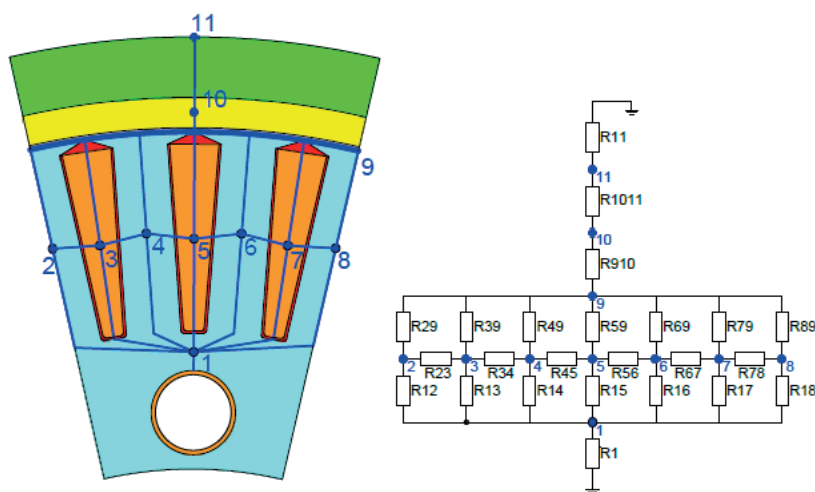
Na Obrázku III je znázorněno rozložení magnetického pole. Chladicí kanály nijak nenarušují rozložení magnetického pole.



**Obrázek III. Rozložení magnetického pole ve stroji**

### III. VÝPOČET OTEPLENÍ STROJE

Pomocí analytického výpočtu byl proveden zjednodušený výpočet oteplení při jmenovité rychlosti  $n = 798$  ot/min pro 1/14 stroje podle [2]. Na Obrázku IV. je 1/14 stroje s vyznačenou tepelnou sítí a jejími uzly. Výpočet byl proveden pro teplotu okolního prostředí  $40^\circ\text{C}$  a pro teplotu chladicí kapaliny také  $40^\circ\text{C}$ . Ztráty ve stroji byly vypočítány během návrhu stroje a ověřeny v programu RMXprt.



**Obrázek IV. 1/14 stroje s vyznačenou tepelnou sítí**

Pro simulaci oteplení byl zvolen program MOTOR-CAD, který umožňuje tepelné simulace s přesným nastavením geometrie stroje a použitého chlazení. Jako chladicí kapalina byla použita voda o vstupní teplotě  $40^\circ\text{C}$  a průtoku 4 l/min. Simulace byla provedena při okolní teplotě  $40^\circ\text{C}$  a jmenovité rychlosti stroje  $n = 798$  ot/min. Uvažované ztráty stroje byly dosazeny na základě analytického výpočtu. Porovnání výsledných hodnot je v Tabulce III [3].

TABULKA III. VÝSLEDNÉ TEPLOTY V JEDNOTLIVÝCH ČÁSTECH STROJE

Část stroje	Výpočet	MOTOR-CAD
Jho statoru	73,97°C	73,9°C
Vinutí	128,09°C	126,4°C
Statorové zuby	106,17°C	110,8°C
Vzduchová mezera	84,65°C	93,35°C
Permanentní magnety	61,07°C	71°C
Jho rotoru	59,98°C	68,5°C

#### IV. ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout elektromotor pro osobní automobil. Jako pohon automobilu byly zvoleny 2 PMSM motory s vnějším rotorem umístěné v zadních kolech automobilu o celkovém jmenovitém výkonu  $P = 80 \text{ kW}$ .

Elektromagnetický výpočet byl ověřen analytickým výpočtem v programu ANSYS-RMxprt a metodou MKP v programu FEMM. Výsledky z těchto programů se shodovaly s vypočtenými s maximální odchylkou  $\pm 6 \%$ . K největšímu rozdílu došlo u statorového jha a to o 0,4 T. Tato odchylka je způsobena tím, že při návrhu se nepočítalo s rozšířením jha o chladicí kanály.

Pro simulaci oteplení byl zvolen program MOTOR-CAD, který umožňuje tepelné simulace metodou náhradní tepelné sítě s přesným nastavením geometrie stroje a použitého chlazení. K největšímu rozdílu mezi vypočítanou a nasimulovanou teplotou došlo u permanentního magnetu, kde je odchylka 10°C. Vzhledem ke své přesnosti a rychlosti výpočtu lze uvedenou tepelnou síť doporučit k výpočtu přibližného oteplení při návrhu stroje s podobnými parametry. Vypočítaná teplota nepřekročila nejvyšší povolenou teplotu třídy F.

#### PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2018-005 a projektu SGS-2018-009: Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích III.

#### LITERATURA

- [1] E. Sokolov, "Comparative study of electric car traction motors," 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, 2017, pp. 348-353. doi: 10.1109/ELMA.2017.7955461
- [2] PYRHONEN, Juha., Tapani JOKINEN a Valeria. HRABOVCOVÁ. "Design of rotating electrical machines. Second edition," Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 9781118701621
- [3] STATON, D.A., HAWKINS D.J., POPESCU M, "Motor-CAD Software for Thermal Analysis of Electrical Motors – Links to Electromagnetic and Drive Simulation Models," CWIEME Berlin June 2010